

УДК 669.018.45

РАДІАЦІЙНО-АБСОРБУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ КОМПЗИТИВ АІ–РЬ

*В. А. БІЛОУС, В. М. БОРИСЕНКО, В. М. ВОЄВОДИН, С. Ю. ДІДЕНКО,
М. І. ІЛЬЧЕНКО, І. М. НЕКЛЮДОВ, О. В. РИБКА*

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

Описано методику і результати експериментів з пропускання монохроматичного пучка електронів з енергією 2,5 MeV крізь зразки із алюмінію та шаруватих композитів Al–Pb з різною внутрішньою архітектурою. Встановлено, що порівняно з алюмінієм досліджені композити мають вищу поглинальну здатність. Це дає змогу або знизити вагу радіаційно-захисної структури за збереження ефективності захисту на рівні алюмінію, або підвищити ефективність захисту за незмінної ваги цієї структури.

Ключові слова: *багатошарові композити, радіаційно-абсорбувальні властивості і матеріали, пучок високоенергетичних електронів.*

Одним з актуальних завдань, що стоять перед розробниками нових поколінь космічних апаратів (КА), є підвищення рівня їх експлуатаційної надійності в умовах тривалого перебування у позаземних умовах. Серед безлічі різноманітних чинників, що визначають цю характеристику КА, чи не найістотнішим є ресурс безвідмовного функціонування апаратури і приладів.

Раніше встановили, що різні електронні пристрої виходять з ладу в космосі значно частіше і швидше, ніж їх аналоги в земних умовах. Це обумовлено тим, що на орбіті ці пристрої перебувають під дією іонізуючого випромінювання, основними джерелами якого є галактичні космічні промені, сонячний вітер і пояси Ван Алена.

На сьогодні сформувалися два підходи для зменшення впливу радіаційно-індукованих ефектів на функціональні характеристики бортової електроніки. Перший – це розроблення радіаційно-стійких напівпровідникових матеріалів і електронних пристроїв на їх основі [1]. Другий – зосереджується на створенні нових радіаційно-абсорбувальних (РА) матеріалів та радіаційно-захисних структур із них, інтегрованих у конструкції КА. Цей підхід, не будучи альтернативою першому, є загальніший, оскільки дає змогу знизити радіаційне навантаження як на електронні пристрої, так і на інші об'єкти на борту КА, в першу чергу на біологічні.

Слід зазначити, що досить суттєві вагові та габаритні характеристики радіаційно-захисних структур, які широко застосовуються в різних наземних стаціонарних і мобільних об'єктах (ядерно-енергетичні установки, сховища радіоактивних відходів, ізотопні джерела іонізуючого випромінювання тощо), обумовлені невисокою ефективністю традиційних гомогенних РА матеріалів. Тому використовувати їх та аналоги відомих структур для захисту КА неможливо.

Одним з перспективних напрямків у розробленні нових високоефективних РА матеріалів є створення ламінатних (шаруватих) просторових структур, що складаються з окремих шарів двох (або більше) гомогенних матеріалів з різним атомним номером Z . Об'єднання в одній гетерогенній структурі речовин з малим

та великим Z створює умови для багаторазового відбиття частинок і γ -квантів від поверхонь контакту шарів цих речовин та повернення фотонів у шари, заповнені високопоглинальним матеріалом, не виходячи за зовнішні межі структури.

Завдяки своїй специфічній будові така структура є своєрідною пасткою для фотонів і тому має вищі захисні характеристики порівняно з гомогенними матеріалами, з яких вона складається. Тобто до механізмів розсіяння та поглинання на атомарному рівні, які притаманні гомогенним матеріалам, у гетерогенних додаються ще й такі механізми, які можна розглядати як структурно зумовлені.

Результати розрахунково-аналітичних досліджень еволюції характеристик потоку фотонів рентгенівського і γ -випромінювання [2] та високоенергетичних електронів [3], яка відбувається у шаруватих структурах, показують, що критерієм найліпших матеріалів для багат шарових структур є найбільша різниця коефіцієнтів відбиття сусідніх шарів. Цьому критерію відповідають легкі та важкі метали з відповідно малим і великим Z .

Про високу практичну значимість досліджень у галузі створення РА композитів свідчить вартість виведення на орбіту 1 кг навантаження: від 3000...5000 \$ (для низьких орбіт) до 30000 \$ (для високих). Отже, зниження ваги багатотонного апарата на 100...200 кг (що цілком реально) суттєво його здешевить та/або дасть можливість збільшити вагу корисного навантаження для виконання головного функціонального призначення апарата.

Методики і матеріали. Компонентами створених і досліджених шаруватих композитів типу “легкий метал–важкий метал” обрали алюміній ($Z_{Al} = 13$) і свинець ($Z_{Pb} = 82$). Відзначимо, що малолеговані сплави алюмінію – це матеріали, які широко використовують у конструкціях різноманітних КА і тому РА здатність композитів порівнювали з алюмінієм.

Щоб виготовити композити Al–Pb, розробили методику, аналогічну раніше описаній [4], яка передбачає послідовне застосування вакуумної та звичайної повітряної прокатки. Використовуючи цю методику, виготовили дво- і п’ятишарові смуги різної товщини, з яких вирізали зразки у формі диска діаметром 55 mm. Їх характеристики наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики досліджених зразків

№ зразка	1	2	3	4	5
Склад	Al	Al–Pb	Pb–Al	Al–Pb–Al–Pb–Al	Pb–Al–Pb–Al–Pb
Товщина, mm	1,85	1,15	1,15	1,00	0,78
Об’ємна частка алюмінію у зразку	1,00	0,81	0,81	0,73	0,56
Об’ємна щільність, g/cm ³	2,7	4,36	4,36	5,0	6,47

Необхідність отримання композитних смуг різної товщини та вибір товщини алюмінієвої смуги обумовлені тим, що коректне порівняння РА ефективності матеріалів різного складу і будови можливо тільки за використання зразків з однаковою поверхневою щільністю χ , яка дорівнює добутку об’ємної щільності ρ конкретної смуги на її товщину h . Отже, вплинути на χ пластини з певного матеріалу густиною ρ можна тільки, змінюючи її h . Всі зразки, використані в експериментах з опромінення, мали $\chi = 0,5 \text{ g/cm}^2$.

Експерименти з пропускання монохроматичного пучка електронів з енергією 2,5 MeV проводили на електростатичному прискорювачі електронів ЕЛІАС виробництва фірми High Voltage Engineering Corporation, модель KS/3000. Для ефективного використання прискорювального часу та зниження витрат на тестування розробили і виготовили спеціальну карусельну систему подачі зразків під пучок.

Пучок електронів, прискорених до енергії 2,5 MeV, за допомогою магнетних лінз розфокусовували до діаметра ~ 10 см, а потім мідним коліматором з його центральної частини вирізали пучок перерізом $\approx 1,5 \times 1,5$ mm², який через вихідне вікно електронопрооводу подавали безпосередньо на досліджуваний зразок, за яким розташований детектор. Щоб зменшити вплив γ -фону від прискорювача на результати досліджень, пристрій зміни зразків разом з детектором захищали стінкою зі свинцевих блоків.

Детектором електронів і γ -квантів слугував кристал із напівпровідникової сполуки CdZnTe розміром $10 \times 10 \times 5$ mm³. Цей кристал був підключений до вимірювальної системи, керованої персональним комп'ютером і запрограмованої на безперервне вимірювання струму через детектор в автоматичному режимі з інтервалом 1,217 с.

Під час експериментів вимірювали сумарну енергію ${}^{\text{pen}}E$ електронів і γ -квантів, які проникли крізь досліджуваний зразок. Відносна похибка вимірювань не перевищувала 2%.

Результати досліджень та їх обговорення. РА ефективність досліджених зразків (табл. 2) оцінювали за енергією ${}^{\text{abs}}E$, затриманою (тобто поглиненою і відбитою) зразком. Отже, ${}^{\text{abs}}E = 2,5 \text{ MeV} - {}^{\text{pen}}E$. Для порівняння цієї характеристики композитів і алюмінію обрали коефіцієнт ефективності $K_{\text{eff}} = {}^{\text{abs}}E_{\text{com}} / {}^{\text{abs}}E_{\text{Al}}$, який для алюмінію дорівнює одиниці.

Таблиця 2. Радіаційно-абсорбувальні характеристики досліджених зразків

№ зразка	1	2	3	4	5
${}^{\text{pen}}E$, MeV	1,35	0,80	0,84	0,78	0,68
${}^{\text{abs}}E$, MeV	1,15	1,70	1,66	1,72	1,82
K_{eff}	1,00	1,48	1,44	1,50	1,58

Щоб полегшити аналіз отриманих експериментальних результатів та формулювання висновків, умовно розділимо досліджені композитні зразки на дві групи: перша – зразки № 2 і 3 несиметричної будови, друга – зразки № 4 і 5 симетричної.

Зразки першої групи, вирізані з однієї композитної смуги, але звернені до падаючого пучка шаром легкого (зразок № 2, схема “легкий–важкий”) і важкого металу (зразок № 3, схема “важкий–легкий”), продемонстрували різну РА ефективність, причому різниця величин ${}^{\text{abs}}E$ (0,04 MeV) дещо більша за похибку вимірювань. Експериментально встановлений факт переваги схеми “легкий–важкий” порівняно зі схемою “важкий–легкий” повністю узгоджується з результатами розрахунково-аналітичних досліджень [3] і дає змогу припустити, що збільшення кількості шарів композита (а отже, кількості інтерфейсів “легкий–важкий”) може забезпечити зростання РА ефективності композитів за незмінної об’ємної частки легкого металу в них.

Аналогічне порівняння результатів для зразків другої групи неможливе, оскільки об’ємні частки алюмінію в них істотно різні. Водночас можна говорити про збільшення радіаційно-захисної ефективності композитів зі зменшенням в них частки алюмінію.

Даючи комплексну оцінку зразків другої групи, потрібно відзначити, що, незважаючи на меншу (порівняно зі зразком № 5) величину ${}^{\text{abs}}E$ для зразка № 4, композит цього типу має переваги порівняно з іншими дослідженими композита-

ми. По-перше, зовнішні шари з алюмінію забезпечують йому вищу корозійну тривкість і виключають контакт токсичного свинцю з навколишнім середовищем. По-друге, можна спрогнозувати, що його механічні властивості будуть вищі, ніж у композита того ж типу (зразок № 5), який має не тільки вищу радіаційно-захисну ефективність, але і містить велику об'ємну частку низькоміцного свинцю.

ВИСНОВКИ

Узагальнюючи результати, слід підкреслити, що вони є експериментальним обґрунтуванням висновків, дуже важливих для практики застосування РА композитів у конструкціях різних КА, а саме: за однакової ваги матеріалів РА здатність композита в $\sim 1,5$ рази вища за АІ, а за однакової РА здатності матеріалів вага композита в $\sim 1,5$ рази менша за АІ. Отже, застосування композитів замість АІ може дати два різних ефекти: збільшити у 1,5 рази ефективність радіаційного захисту за незмінної ваги радіаційно-захисної структури; зменшити в 1,5 рази вагу радіаційно-захисної структури за незмінної ефективності радіаційного захисту.

РЕЗЮМЕ. Описаны методика и результаты экспериментов по пропусканию монохроматического пучка электронов с энергией 2,5 MeV сквозь образцы из алюминия и слоистых композитов Al-Pb с различной внутренней архитектурой. Установлено, что по сравнению с алюминием исследованные композиты обладают более высокой поглощающей способностью. Это позволяет или снизить вес радиационно-защитной структуры при сохранении эффективности защиты на уровне алюминия, или повысить эффективность защиты при неизменном весе этой структуры.

SUMMARY. The methodology and results of experiments on the penetration of monochromatic electron beam with energy of 2.5 MeV through the samples of aluminum and of layered composites Al-Pb with different internal architecture are described. It is established that in comparison with aluminum the composites have a high absorption capacity. This allows reducing the weight of radiation-protective structures while maintaining the efficiency of protection at the level of aluminum or increasing the effectiveness of protection in its current weight.

1. *Коришонов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А.* Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
2. *Белоус В. А., Комаров А. О., Шляев Б. А.* Защитные тонкопленочные многослойные экраны от рентгеновского и гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 1 (17). – С. 202–204.
3. *Борц Б. В., Марченко И. Г., Бездверный П. Н.* Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал // Там же. – 2009. – № 4–2. – С. 175–177.
4. *Перспективы производства и использования металлических микроламинатов, получаемых вакуумной прокаткой / И. М. Неклюдов, В. Н. Воеводин, С. Ю. Диденко и др.* // Там же. – 2010. – № 5. – С. 89–94.

Одержано 05.06.2013